

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

A. Eitutis / A. Palionis

Analyse der Kalibrierunsicherheit von Waagen

1. Einleitung

Am Ende 2004 wurde das EA-Dokument „Richtlinie der Kalibrierung nichtselbsttätiger Waagen“ [1] veröffentlicht, das auch für die Kalibrierlaboratorien von Wägegeräten in der Litauischen Republik verbindlich ist. Im Anhang G werden drei Beispiele der Kalibrierung von Analysewaagen 200 g, von Mehrbereichsplattformwaagen 60 kg und von technischen Waagen 30 t angeführt. Die angeführten Beispiele sind völlig kennzeichnend und fassen eine breite Palette der zu kalibrierenden Waagen um. Hier werden ausführlich Kalibrierabläufe erläutert und Berechnungen aller Unsicherheitskomponenten dargestellt. Es ist bezeichnend, dass die Kalibrierunsicherheit und die Unsicherheit beim Wägen von Lasten durch einen Waagennutzer unter Betriebsbedingungen in der Richtlinie getrennt sind. Das Kalibrierlaboratorium kann nach dem Waagennutzerwunsch die Unsicherheit für das Wägen am Arbeitsplatz bestimmen. Da mehr Unsicherheitskomponenten in diesem Fall entstehen oder Werte der bestimmten Komponenten zunehmen, wird die Wägeunsicherheit grösser als bei der Kalibrierung. Es wird der Begriff „der globalen“ Unsicherheit („global uncertainty“) eingeführt, der sowohl systematische als auch zufällige Unsicherheitskomponenten umfasst. Falls der Waagennutzer nach der maximalen Genauigkeit nicht strebt, ist diese Unsicherheit sehr günstig, weil die Messergebnisse keine Korrektur brauchen. Sehr bedeutsam ist es, dass die Kalibrierunsicherheit sowie „die globale Unsicherheit“ des Nutzers durch die Gleichung beschrieben werden können, die die gesamte Unsicherheit mit der Grösse der Wägemasse in Verbindung setzt. Dann kann der Waagennutzer die Wägeunsicherheit beim Wägen der beliebigen Last einfach bestimmen. In der Richtlinie wird der dementsprechende mathematische Apparat angeführt.

Nach der Richtlinie wird jedoch gefordert, im Kalibrierschein alle im Kalibrierverlauf bestimmten Größen anzugeben, also nicht nur den gesamten Unsicherheitswert, wie es nach der DKD-R 7-1 [2] zugelassen wird und auf viele Kalibrierlaboratorien beruhen. Es ist völlig gerechtfertigt, dass der Zusammenhang der gesamten bzw. „globalen“ Unsicherheiten mit der Wägemasse durch die lineare Funktion beschrieben werden, obwohl nach den angeführten Formeln ein ausführlicheres mathematisches Modell für die Unsicherheit gebildet werden kann.

Im vorgestellten Ansatz werden die Analyse der Kalibrierung nach [1] durchgeführt und wichtige für Kalibrierpraxis Schlussfolgerungen gezogen.

2. Komponenten der Kalibrierunsicherheit von Waagen

In Richtlinien werden folgende Komponenten der Kalibrierunsicherheit festgelegt:

1. Wiederholbarkeit der Messergebnisse u_{rep} ;
2. Auflösung der Anzeigeeinrichtung u_d ;
3. Einfluß der Luftbewegung infolge der Temperaturdifferenz zwischen Gewichtsstück und Waage u_{conv} ;
4. Kriechen und Hysterese der Waage u_{cr} ;
5. Einfluß der außermittigen Position des Gewichtsstückes auf der Waageschale u_{ecc} ;
6. Fehler der konventionellen Masse des Gewichtsnormales u_{mc} ;
7. Zeitliche Massendrift des Gewichtsnormales u_{md} ;
8. Unsicherheit der Schwimmfähigkeit in der Luft des Gewichtsstückes u_{mb} .

Die gesamte Standardunsicherheit der Kalibrierung wird durch Summieren von Varianzen der Unsicherheiten bestimmt:

$$u_{\Sigma}^2 = u_{rep}^2 + u_{d0}^2 + u_{dl}^2 + u_{conv}^2 + u_{cr}^2 + u_{ecc}^2 + u_{mc}^2 + u_{md}^2 + u_{mb}^2, \quad (1)$$

wobei u_{d0} – Standardunsicherheit der Waageauflösung am Nullpunkt; u_{dl} – Standardunsicherheit der Waage bei der Belastung der Waage mit Kalibrierlast.

Für die weitere Analyse werden beide diesen Komponenten durch eine nach der Formel

$$u_d^2 = u_{d0}^2 + u_{dl}^2 \quad (2)$$

ersetzt.

Der Anteil (Einfluß) jeder Komponente in der gesamten Unsicherheit wurde als Verhältnis der Varianz entsprechender Komponente mit der Varianz der gesamten Unsicherheit ermittelt:

$$d_{si} = \frac{u_i^2}{u_{\Sigma}^2} 100 \%. \quad (3)$$

Aufgrund des Kennwertes d_{si} wurde der Einfluß der Kalibrierunsicherheiten von einzelnen Komponenten beurteilt.

3. Analysewaagen 200 g

Im Bild 1 wird der Aufbau der Kalibrierunsicherheit von Analysewaagen und die relative Bedeutung der einzelnen Komponenten bei dem Kalibrieren am Skalenanfang (30 g) und Skalenende (200 g) dargestellt. Das Kalibrieren wurde mit den Gewichtsstücken der Genauigkeitsklasse E₂ ausgeführt. Infolge der Geringfügigkeit wurden in diesem Fall die Komponenten 3, 4 und 5 unberücksichtigt. Im Aufbau der Kalibrierunsicherheit von diesen Waagen, was im Bild ersichtlich ist, dominieren zwei Komponenten: Die Wiederholung der Waage am Skalenanfang u_{rep} (65 %) und der Fehler der Masse des Gewichtsnormales u_{mc} (55 %) bei der Belastung mit grösseren Gewichtsstücken. Die Unsicherheit der Massendrift des Gewichtsnormales u_{md} und insbesondere die Unsicherheit der Schwimmfähigkeit in der Luft u_{mb} haben einen ziemlich geringen Einfluss – entsprechend max 7 % und max 3 %.

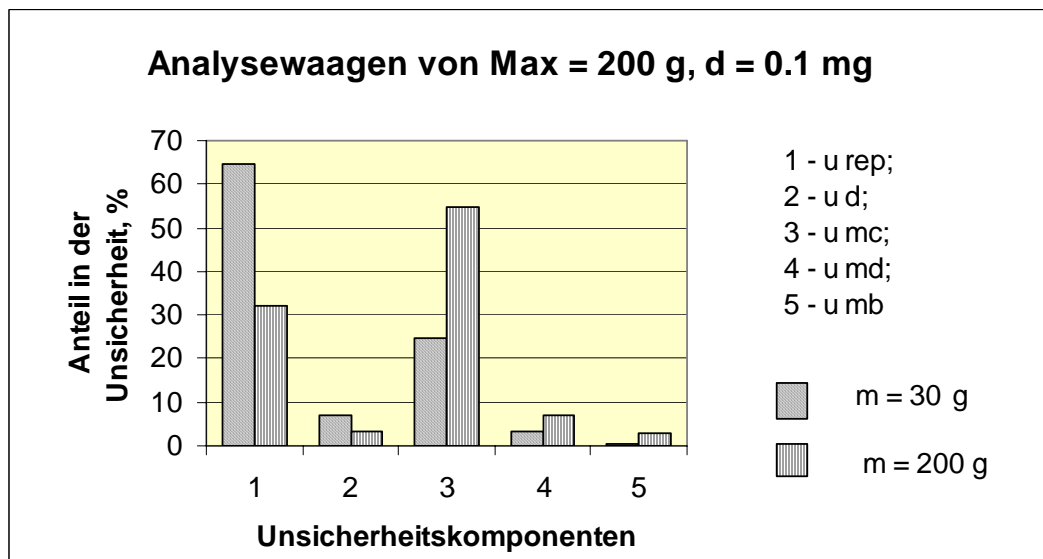


Bild 1. Aufbau der Kalibrierunsicherheit von Analysewaagen 200 g: 1 - Wiederholbarkeit der Messergebnisse; 2 – Auflösungsfehler; 3 - Fehler des Gewichtsnormales; 4 - Massendrift des Gewichtsnormales; 5 – Fehler infolge der Schwimmfähigkeit in der Luft.

4. Mehrbereichsplattformwaagen 60 kg ($d = 2/5/10\text{g}$)

Den grössten Einfluss auf den gesamten Unsicherheitswert haben in diesem Fall auch zwei Komponenten: Die Wiederholung der Waage am Skalenanfang u_{rep} (61 %) bei der Masse 10 kg und die Auflösung der Waage u_d (53 %) bei der Masse 60 kg (Bild 2). Die zunehmende Bedeutung der Auflösung (des Teilungswertes) ist damit verknüpft, dass der Teilungswert der Mehrbereichswaage beim Wägen der maximalen Last wesentlich grösser als am Skalenanfang ist. Außerdem ist die Zunahme des Einflusses des Teilungswertes auf die gesamte Unsicherheit auch davon abhängig, dass er zweimal abgeschätzt werden soll (s. Formel 2) – beim Ablesen der Null-Anzeige und der Anzeige bei der Belastung der Waage mit dem Gewichtsnormal. Die anderen Unsicherheitskomponenten nicht überschreiten 10 %. Der Einfluss der Schwimmfähigkeit von Gewichtsstücken in der Luft ist unbedeutend.

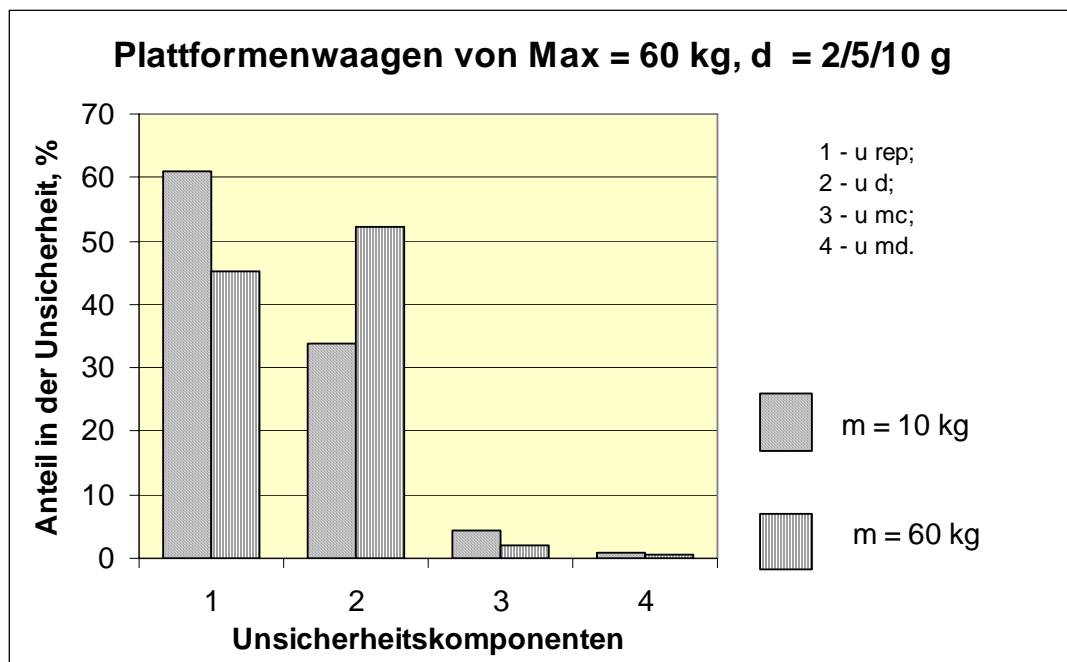


Bild 2. Aufbau der Kalibrierunsicherheit von Mehrbereichsplattformwaagen 60 kg: 1 - Wiederholbarkeit der Messergebnisse; 2 – Auflösungsfehler; 3 - Fehler des Gewichtsnormales; 4 - Massendrift des Gewichtsnormales.

5. Technische Waagen 30 t

Der Aufbau der Kalibrierunsicherheit von diesen Waagen ist im Bild 3 dargestellt. Das Kalibrieren wurde bei der Verkleinerung des Skalenteilungswertes um zehnmals ($d = 1\text{ kg}$) durchgeführt. Infolgedessen ist die Auflösungskomponente ganz gering geworden. Als

Gewichtsnormale wurden 12 Gewichtsstücke Klasse M_1 , je 500 kg, benutzt. Weil die maximale Wägemasse der Waage sehr gross ist, wurden Restgewichte mit ersetzbaren Gewichtsstücken (Taralast) realisiert. Dafür wurden 6 mit den metallischen Teilen befüllten Behälter benutzt. Die Masse jedes Behälters (ca. 3 t) wurde durch den Vergleich mit den genormten Gewichtsstücken bei der Benutzung derselben zu kalibrierenden Waage bestimmt. Die Unsicherheit der Masse von der gesamten Normlast war infolgedessen sehr gross. war infolgedessen sehr gross.

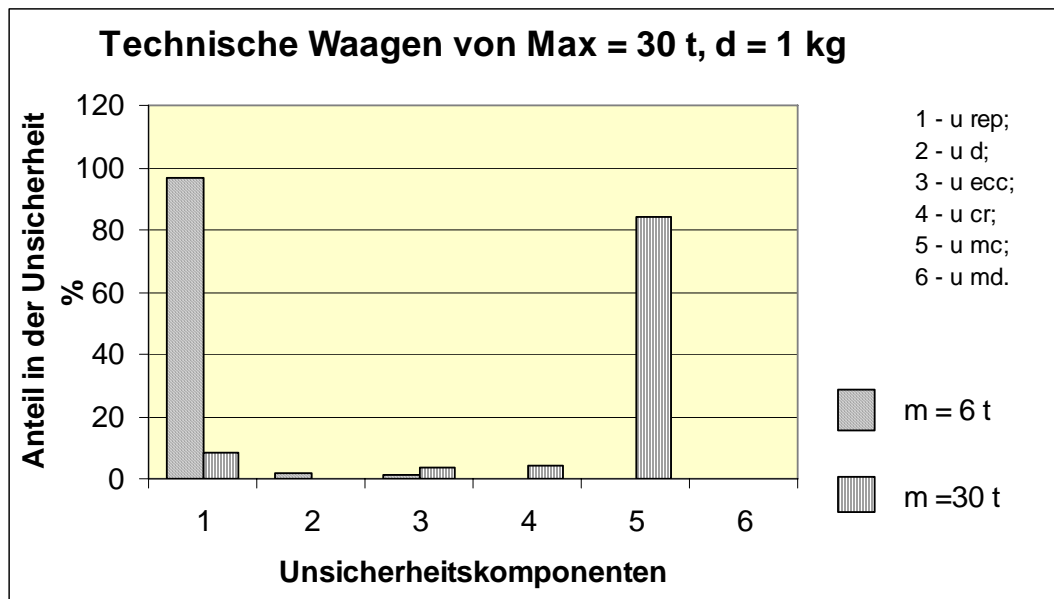


Bild 3. Aufbau der Kalibrierunsicherheit von technischen Waagen 30 t mit d = 1 kg: 1 – Wiederholungskomponente; 2 – Auflösungskomponente; 3 – Komponente infolge außermittiger Belastung; 4 – Komponente wegen des Kriechens und der Hysterese; 5 - Fehler des Gewichtsnormales; 6 - Massendrift des Gewichtsnormales.

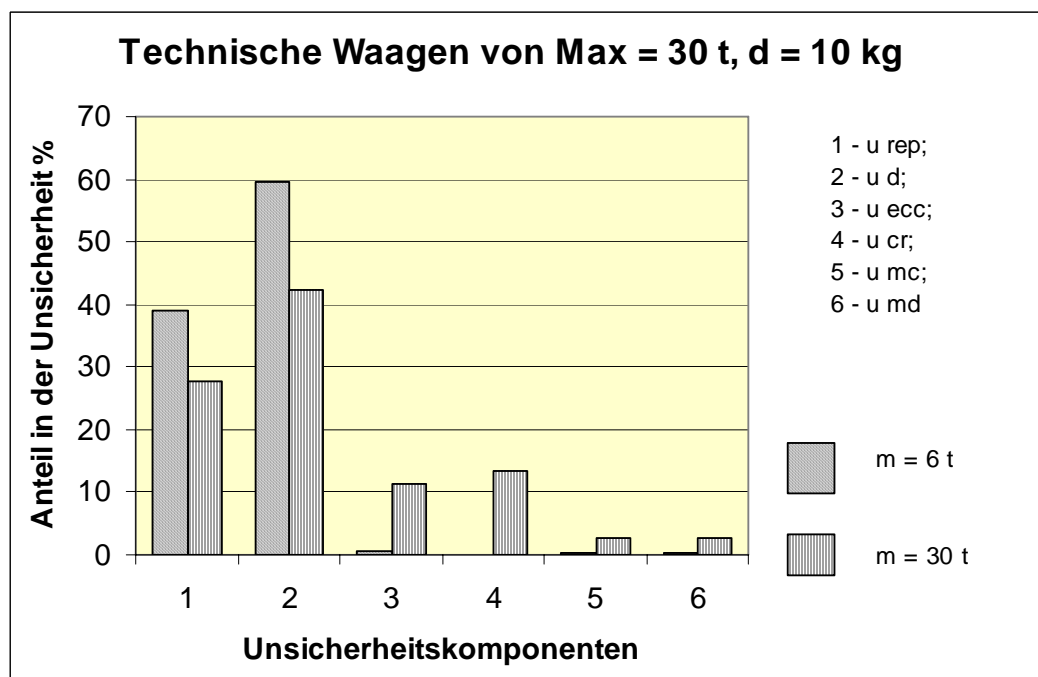


Bild 4. Aufbau der Kalibrierunsicherheit von technischen Waagen 30 t mit $d = 10$ kg: 1 – Wiederholungskomponente; 2 – Auflösungskomponente; 3 – Komponente infolge ausermittiger Belastung; 4 – Komponente wegen des Kriechens und der Hysterese; 5 - Fehler des Gewichtsnormales; 6 - Massendrift des Gewichtsnormales.

Aus diesem Grund ergab sich, dass die dominierende Komponente beim Kalibrieren am ersten Punkt (6 t) die Wiederholbarkeit der Waage ist (96 % von der gesamten Unsicherheit). Beim Kalibrieren am Endpunkt (30 t) war die grösste die Unsicherheitskomponente der Masse von ersetzbaren Gewichtsstücken (84 %). In diesem Fall sollen die Komponenten der ausermittigen Belastung und des Kriechens berücksichtigt werden, weil die Waageplattform eine lange Zeit unter sehr grosser Belastung war. Der Einfluss dieser Komponenten ist jedoch unbedeutend.

Obwohl solcher Fall am Beispiel nicht untersucht wird, wäre es interessant zu folgen, wie sich der Aufbau der Kalibrierunsicherheit verändern würde, wenn das Kalibrieren solcher Waage beim Betriebsteilungswert 10 kg und mit allen Gewichtsstücken der Genauigkeitsklasse M_1 durchgeführt werden würde. Dann würde sich der Aufbau der Waagekalibrierunsicherheit wesentlich verändern, was im Bild 4 dargestellt ist. Bemerkbar ist, dass der Massefehler von Normgewichtsstücken für diesen Fall geringfügig würde. Dann würden zwei Komponenten dominieren: die Wiederholbarkeit (bis 40 %) und Auflösung der Waage (bis 60 %).

6. Analyse

Die untersuchten Beispiele beweisen, dass die wichtigsten Komponenten im Aufbau der Kalibrierunsicherheit von Waagen sind: Der Wiederholbarkeit und Auflösung der Waage sowie der Masse von Normgewichtsstücken.

Die Komponente der Wiederholbarkeit von Waagen ist auf alle Fälle wichtig. Es ist zu bezeichnen, dass diese Komponente über die lange Zeitdauer die Streuung der Waageanzeige nicht völlig widerspiegelt., was im Bericht [3] angeführt wird. Die ausführlichen Untersuchungen des genauen Massekomparators haben mit Hilfe der Dispersionsanalyse gezeigt, dass die dauerhafte Anzeigestreuung während eines Versuches um fast dreimal grösser als die Wiederholbarkeitsstreuung ist. Tatsächlich kennzeichnet diese Streuung die Übereinstimmung der Wäageergebnisse [4]. Selbstverständlich ist es, dass die Einbeziehung der Übereinstimmungskennndaten in die Kalibrierunsicherheit nicht zweckmässig ist, weil die Kalibrierung im bestimmten Zeitmoment die einmalige

Handlung ist und deswegen genügt die Wiederholbarkeitsunsicherheit allein. Jedoch ist diese Komponente für die Vorhersage der Waageunsicherheit beim Waagenutzer innerhalb der Betriebszeit unzureichend.

Daraus folgt, dass bei der Vorstellung des Unsicherheitswertes als der Wägeunsicherheit in der Verwendung diese erhöhte Streuung als Kennzeichnung der Übereinstimmung berücksichtigt werden sollte.

Die Waageauflösung, die eindeutig vom Teilungswert abhängt, ist auf viele Fälle insbesondere bei der Kalibrierung von Waagen der niedrigeren Genauigkeit mit Normgewichtsstücken wichtig.

Der Massefehler von Normgewichtsstücken ist bei der Kalibrierung der genauen Waagen mit dem kleinen Teilungswert sowie bei der Kalibrierung von Höchstlastwaagen mit ersetzbaren Gewichtsstücken bedeutend. Auf andere Fälle ist dieser Fehler gering.

Es ist zu bezeichnen, dass die Umgebungstemperatur bei der Ermittlung der Kalibrierunsicherheit nach der Richtlinie [1] direkt unberücksichtigt wird. Jedoch ist sie für die Unsicherheit infolge der Luftbewegung und der Schwimmfähigkeit von Gewichtsstücken in der Luft relevant. Nach dem DKD-Verfahren [2] wird die Temperaturkomponente aufgrund des vom Hersteller angeführten Temperaturfaktors der Waage unmittelbar ermittelt. In [1] wird die Unsicherheitskomponente infolge des Temperatureinflusses durch die Vorstellung der Wägeunsicherheit in der Verwendung berücksichtigt.

Die gezogenen Schlussfolgerungen sind auch bei der Entscheidung über die beste Messmöglichkeit (BMM) des Kalibrierlaboratoriums. Die vorhandene Erfahrung, über die BMM des Kalibrierlaboratoriums nur aufgrund des Massefehlers von Normgewichtsstücken zu entscheiden, ist fehlerhaft und ergibt einen wesentlich verminderten BMM-Wert. Bei der Waagekalibrierung durch das Anzeigeablesen von der genormten Anzeigeeinrichtung ist in den Aufbau der BMM die Auflösungskomponente der zu kalibrierenden Waage einzuführen. Diese Komponente kann vermindert werden, wenn die Anzeigeeinrichtung mit dem kleineren Teilungswert bei der Kalibrierung benutzt (wie bei dem dritten Beispiel) oder das Sonderverfahren und die spezielle Einrichtung für die Vergrößerung der Waageauflösung eingesetzt wird. Wahrscheinlich wäre es zweckmässig, in die BMM auch die Wiederholbarkeitskomponente einzuführen. Jedoch, unter der Berücksichtigung der Ansicht, dass das Kalibriergerät bei der Entscheidung über die BMM als ideal betrachtet wird, kann diese Behauptung nicht angenommen werden.

7. Schlussfolgerungen

1. Bei der Kalibrierung von Waagen sind die folgenden drei Komponenten der Kalibrierunsicherheit von Bedeutung: Die Wiederholbarkeit der Messergebnisse, die Auflösung der Anzeigeeinrichtung und der Massefehler des Gewichtsnormales. Der Fehler infolge der Schwimmfähigkeit von Gewichtsstücken in der Luft beträgt bei der Kalibrierung mit Gewichtsstücken der höchsten Präzision (E_1 , E_2) nur einen geringen Anteil der gesamten Unsicherheit. Auf andere Fälle kann dieser Fehler nicht berücksichtigt werden.
2. Der Massefehler der Gewichtsnormale ist nur bei der Kalibrierung der Präzisionswaagen sowie bei der Kalibrierung mit ersetzbaren Gewichtsstücken wichtig.
3. Bei der Vorstellung der gesamten Unsicherheit beim Wägen (nicht beim Kalibrieren) dem Waagennutzer sind nicht nur die Wiederholbarkeit der Messergebnisse sondern auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die letztere kann beim Wägen unter Betriebsbedingungen um einige Male grösser als die Komponente der Reproduzierbarkeit sein.
4. Bei der Entscheidung über die beste Möglichkeit des Kalibrierlaboratoriums ist die Auflösung der Anzeigeeinrichtung der zu kalibrierenden Waage zu berücksichtigen.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] EA – 10/18. Guidelines on the calibration of nonautomatic weighing instruments. 2004.
- [2] Richtlinie DKD - R 7 – 1. Kalibrierung elektronischer nichtselbsttätiger Waagen. Ausgabe 11/1998.
- [3] J. P. Clark. Evaluation of Methods for Estimating the Uncertainty of Electronic Balance Measurements. Westinghouse Savannah River Company Aiken, South Carolina 29808. Report WSRC-MS-99-00958.
- [4] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology. ISO, 1993, 60 p.

Autorenangaben:

Doz. Dr.-Ing. Andrius Eitutis
Doz. Dr.-Ing. Albinas Palionis
Technologische Universität Kaunas
Lehrstuhl für Ingenieurmechanik
Mickeviciaus 37, 44244 Kaunas/Litauen
Tel.: +370-37-323894
Fax: +370-37-323704
E-mail: albinas.palionis@ktu.lt